

# CC 型一次表面传热与阻力特性试验研究

马虎根<sup>1</sup>, 段 芮<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海电力学院 能源与环境工程学院, 上海 200090)

**摘 要:** 介绍了一次表面的发展及目前国内外研究的状况, 采用单吹瞬变法对自行设计的 3 种 CC(Cross Corrugated)型一次表面进行传热与阻力特性的试验研究。建立了数学模型, 由数值解求得流体的出口温度与时间及传热单元数  $NTU$  间的函数关系。通过配比, 获得了换热表面在测定工况下的  $NTU$  值。首次获得该 3 种 CC 表面的  $j$  和  $f$  的试验关联式。 $j$  因子和  $f$  因子均随  $Re$  的增加而逐渐下降, 符合紧凑表面传热性能和阻力性能的一般规律。经误差分析, 所提供的试验关联式的拟合误差不大于 15%, 具有足够的工程精度。关联式的使用条件是  $Re=120\sim 800$ , 换热面当量直径为 1.2~1.4 mm, 交错角 45~75°。采用综合评价因子  $j/f$  对 3 种表面的性能进行了分析, 结果表明, 宽高比较大的型面具有较佳的综合性能。所得数据还与国内外其他学者的数值模拟结果进行了比较, 试验数据与数值模拟的结果基本符合。

**关键词:** CC 型一次表面; 单吹瞬变法; 传热与阻力特性; 换热器

中图分类号: TK479; TK124 文献标识码: A

## 引 言

微型燃气轮机是一种新型的动力装置, 近年来在分布式发电等能源系统领域发展迅猛, 为使微型燃气轮机的热效率达到 30%(无回热的简单循环微型燃气轮机热效率为 17%~20%)<sup>[1]</sup>, 必须在燃气轮机循环中使用用于废气余热回收的回热器, 在微型燃气轮机回热器中, 应用较为广泛的回热器表面有板翅式及一次表面(Primary Surface 简称 PS)两种形式。

一次表面回热器传热元件厚度  $\delta$  为 0.3 mm 左右的金属薄片, 流动通道的当量直径在 1.30 mm 左右, 紧凑度可达  $1\ 500\ m^2/m^3$  以上。一次表面是一种板式结构, 冲压一次成形, 避免了板翅式表面中的二次表面, 换热表面都是直接与两侧冷、热流体接触进行传热, 因此这种结构具有紧凑性好(体积小)、重量轻、阻力小、热效率高等特点<sup>[2]</sup>。目前开发和研究的

一次表面, 按照冲压成型后的表面形式, 可分为: CC(Cross Corrugated)、CW(Cross Wavy)和 CU(Corrugated Undulated)等形式。

Ciofalo 等人针对 CC 表面不同几何参数和不同  $Re$ (范围: 500~5 000)<sup>[3]</sup>, 进行传热和流动实验研究, 采用数码彩色液晶成像技术来测量壁面温度, 获得局部换热系数。他们试验研究了 3 种 CC 表面的  $\theta$ 、 $P/Hi$  大小对换热的影响, 得出的结论有:  $f$  随  $P/Hi$  增加而增大,  $Nu$  随  $P/Hi$  增加而减少。文献[4]得到换热表面的平均  $Nu$  和摩擦系数  $f$ , 并试验了  $Re$  在 200~4 000 范围内, 考察了  $P/H$  和交错角的影响。Focke 等人用基于电化学质量传递方法的有限扩散流技术测量表面的质量传递系数的分布, 并通过比拟得到传热的  $Nu$  数<sup>[5]</sup>。

目前, 国内对一次表面型面传热性能与阻力性能的试验研究很少<sup>[6~7]</sup>, 大都是数值模拟计算和回热器整机测试; 国外虽有研究, 但研究结果的具体数据并不多见, 对于换热表面的研究都只是对各种型面的某一种或相似的某几种尺寸进行试验, 且未提供所用形体表面特征的完整资料, 使得有价值的比较研究成为难题, 因此有必要对一次表面做进一步的试验研究。

本研究是对自行设计的 3 种 CC 型一次表面, 针对不同气体流量进行传热及阻力特性试验研究, 获得换热表面传热因子  $j$  和摩擦因子  $f$  的关联式, 考察几何参数对传热和流动阻力的影响, 为一次表面回热器型面的设计和应用提供可靠的试验依据。

## 1 试验系统和试件参数

本研究采用单吹瞬变试验法, 该方法的最大特点是不需测定壁温就可获得换热器的传热特性数据, 尤其适用于 CC 型一次表面一类的紧凑型换热

器表面。

### 1.1 试验原理

对将流入换热面试件的空气进行突然加热, 这时, 空气进口温度将按某种规律变化, 流体的出口温度也相应发生变化。流体出口温度的瞬时变化是其进口温度和传热单元数  $NTU$  的单值函数。通过建立微分方程组, 由分析解或数值解可预先求得流体的出口温度与时间  $\tau$  及传热单元数  $NTU$  间的函数关系。由于  $NTU$  是未知值, 所以要将实验测得的流体出口温度随时间的变化与计算所得的曲线簇进行配比。通过配比, 在某一确定的进口温度条件下, 与实测值最相吻合的那条流体出口温度的理论曲线的  $NTU$  值, 就是该换热表面在测定工况下的  $NTU$  值。

$NTU$  定义为  $NTU = hF / (\dot{m}c_p)_f$  ( $m_f$ —流体的质量流量;  $c_p$ —流体定压比热;  $F$ —换热面积), 因而求得  $NTU$  数就可求得换热器平均表面换热系数  $h$ 。

### 1.2 试验系统

试验所用的小型单吹瞬变技术试验台主要由直流吸风式风洞、进口空气加热系统、测量系统、微机控制和数据采集系统组成, 如图 1 所示。

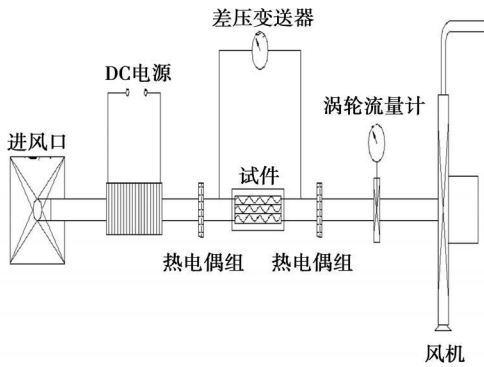


图 1 瞬变试验系统示意图

试验过程为: 室温下的流体(空气)受风机的引风驱动, 进入进风口, 当流动达到稳定后, 突然打开加热器的电源使流体被加热, 试件进口处的流体温度升高并导致被测换热器出口处的流体温度也开始变化, 此时测试系统就可将换热器进出口温度的随时变化予以记录, 从而获得其随时间的变化关系。试验台的主要特点: 采用单吹瞬变法, 只需一侧流体通过就可对紧凑型换热面的换热性能进行测试, 试验范围宽, 在  $NTU > 3$  时测试精度高且具有快速加热特点。试验台的主要设计参数: 迎面风速范围  $0.7 \sim 10 \text{ m/s}$ , 传热单元数  $NTU$  的范围  $0.2 \sim 20$ , 偏离度  $< 0.2$ 。试验台配备了高精度的温度和流量测

试仪表, 数据采集、处理系统和试验过程的控制全部采用计算机完成。

### 1.3 试件结构参数

图 2 为 CC 表面试件示意图。

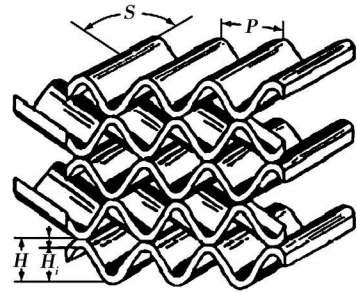


图 2 CC 表面外形示意图

表 1 为本研究采用的 CC 型一次表面 3 种试件的结构参数, 试件材料均为铝。

表 1 CC 型一次表面试件结构参数

	试件 1	试件 2	试件 3
波纹板厚/mm	0.5	0.44	0.5
波距 $P$ /mm	3.4	3.4	3.4
内高 $H_i$ /mm	0.8	0.66	0.8
$P/H_i$	4.25	5.15	4.25
板间距 $H$ /mm	1.3	1.1	1.3
波纹板宽/mm	115	115	115
试件长度/mm	120	120	120
通道交错角/ $^\circ$	60	45	75
当量直径/mm	1.422	1.214	1.422
总换热面积/ $\text{m}^2$	2.286	2.507	2.556
紧凑度/ $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$	1 840	2 018	2 058

## 2 数据处理结果与分析

本次试验使用 Lab Windows/CVI 所编的瞬变测试技术数据处理软件处理数据文件。

### 2.1 试验结果

在紧凑型换热器的设计及计算中, 通常采用两个无量纲参数  $j$  因子和  $f$  因子来衡量换热面的传热性能和阻力性能。  $j$  因子和  $f$  因子分别定义为:

$$j = \frac{Nu}{RePr^{1/3}}, f = \frac{\Delta P D_e}{2 \rho L u^2} \quad (1)$$

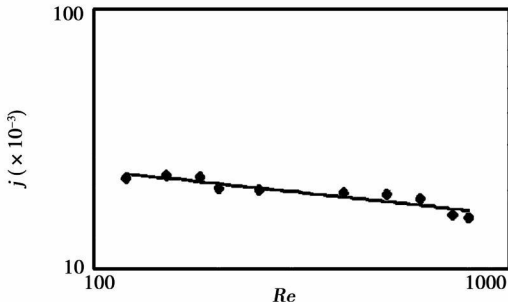
式中:  $\Delta P$ —试件进出口空气流动压差, Pa;  $D_e$ —当量直径, m;  $L$ —试件的纵向长度, m;  $u$ —空气平均流速, m/s;  $\rho$ —空气的密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

对 3 种试件进行实验研究, 所得结果为:

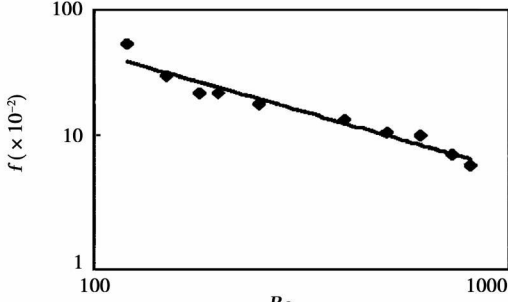
试件 1 的试验结果如图 3 所示, 式(2)为  $j$  因子

和  $f$  因子的拟合关系式:

$$j=0.0531Re^{-0.1724}, f=29.13Re^{-0.8886} \quad (2)$$



(a)  $j$  因子

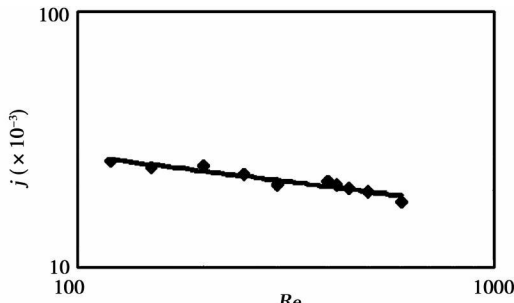


(b)  $f$  因子

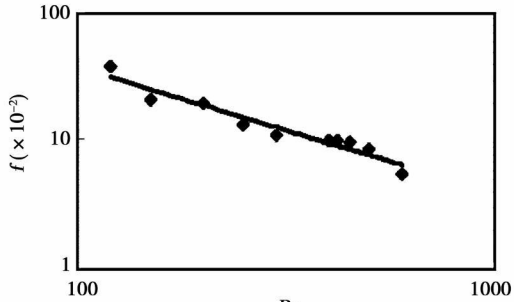
图 3 试件 1 的  $j-Re$  和  $f-Re$  关系

试件 2 试验结果如图 4 所示, 式(3)为  $j$  因子和  $f$  因子的拟合关系式:

$$j=0.07041Re^{-0.2048}, f=34.328Re^{-0.9793} \quad (3)$$



(a)  $j$  因子

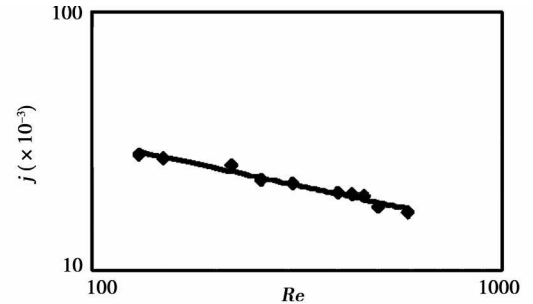


(b)  $f$  因子

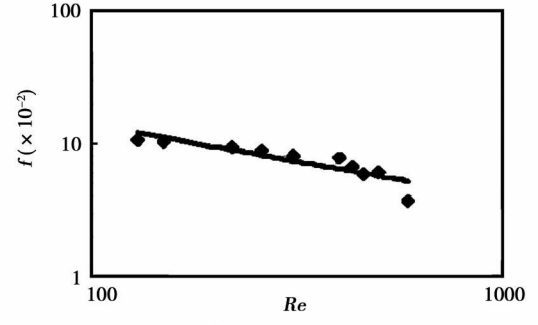
图 4 试件 2 的  $j-Re$  和  $f-Re$  关系

试件 3 试验结果如图 5 所示, 式(4)为  $j$  因子和  $f$  因子的拟合关系式:

$$j=0.1483Re^{-0.3371}, f=1.6986Re^{-0.5457} \quad (4)$$



(a)  $j$  因子



(b)  $f$  因子

图 5 试件 3 的  $j-Re$  和  $f-Re$  关系

从以上图可看出, 本次实验中 3 个试件的  $j$  因子和  $f$  因子都是随  $Re$  的增加而逐渐下降的, 而根据  $j$  因子和  $f$  因子的定义式(1)来看, 换热系数和阻力随  $Re$  的增加而增加, 这符合紧凑表面传热性能和阻力性能的一般规律。

经误差分析, 本研究所提供的实验关联式的拟合误差不大于 15%, 这对工程应用来说, 精度是足够的。式(2)、式(3)和式(4)所列关联式的使用条件是  $Re=120\sim 800$ , 换热面当量直径为  $1.2\sim 1.4\text{ mm}$ , 交错角  $45\sim 75^\circ$ 。

### 2.2 换热面综合性能分析

对于一次表面等紧凑型表面, 工程上常以  $j$  因子和  $f$  因子的比值来衡量它们的综合性能, 图 6 给出 3 个试件的  $j/f-Re$  的对比曲线, 从图中可以看出:  $j/f$  值随  $Re$  的变化关系基本一致, 均随  $Re$  的增大而增大。这表明, 随着  $Re$  的增加, 阻力的增加速度不及换热系数的增加速度, 即阻力系数  $f$  随  $Re$  的变化规律是随雷诺数的增大而减小且变化越来越平缓, 这与文献[8]所得的数值模拟结论一致。因而, 对同一换热器来说, 在较大  $Re$  下, 换热面的综合性能更佳。这一点也可以从 3 组公式中看出, 即  $f$  因子的表达式中,  $Re$  的幂的绝对值较大。另外, 试件 1 和试件 3 变化趋势相同, 试件 2 的  $j/f$  变化趋势明显与其它两个不同, 随  $Re$  的变化比较剧烈, 当  $Re$  增加时,  $j/f$  曲线迅速增长, 当达到 800 左右时, 试件 2 的  $j/f$  值已超过

试件 3。这是因为, 试件 1 和试件 3 的一些主要几何参数  $P$ 、 $H_i$  及  $P/H_i$  均相同, 仅交错角不同, 而试件 2 的  $P$ 、 $H_i$  及  $P/H_i$  均与其它两个试件不同, 因此传热和阻力性能的特征也有差异。

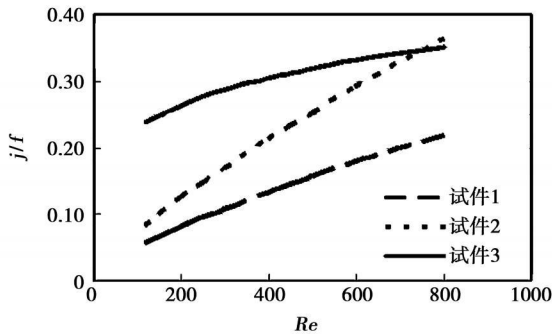


图 6 3 个试件  $j/fRe$  的比较

就试验范围内, 3 个试件中, 试件 3 在相同  $Re$  时, 其  $j/f$  值均明显大于试件 1 和试件 2,  $j/f$  值大小排序为: 试件 3 > 试件 2 > 试件 1。由试验结果确认, 在所进行的试验范围内, 试件 3 表面具有较佳的综合性能。

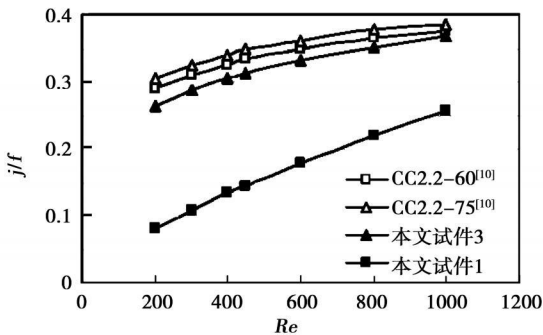


图 7 本次试验试件 1 和试件 3 与文献 [10]  $j/f$  的比较

文献 [8] 认为综合考虑表面努塞尔特数和摩擦系数两个因素的共同结果, 可得到宽高比  $P/H=2$  左右的表面结构最佳, 在工程实际应用中应优先考虑。聂嵩和 Utriainen 也有同样的结论<sup>[9~10]</sup>。现在比较一下文献 [10] 中两种试件 CC2.2-60、CC2.2-75 和本次试验试件 1 和试件 3 的  $j/f$  值, 如图 7 所示, 其中, CC2.2-60 表示为宽高比 ( $P/H_i$ ) 为 2.2、通道交错角为  $60^\circ$  的试件, 其余类推。由图 7 还看出, 在相同  $Re$  下, 本次试验的试件 1 和试件 3 的  $j/f$  值均明显小于文献 [10] 的 CC2.2-60、CC2.2-75 的  $j/f$  值。从表 1 的数据可看到本次试验的试件 1 和试件 3 的宽高比  $P/H_i=4.25$ , 较文献 [10] 的值大, 因此, 所得到的比较结果是符合上述结论的。

### 3 结 论

(1) 对 3 种 CC 型一次表面进行换热与阻力特性的试验研究, 首次得到 3 种 CC 表面的  $j$  和  $f$  试验关联式, 并与国内外学者的数值模拟结果进行了分析比较, 试验数据与数值模拟的结果基本符合。

(2) CC 表面换热系数和阻力随  $Re$  的增加而增加, 符合紧凑表面传热性能和阻力性能的一般规律。本研究所提供的试验关联式的拟合误差不大于 15%, 具有足够的工程应用精度。关联式的使用条件是  $Re=120\sim 800$ , 换热面当量直径为  $1.2\sim 1.4$  mm, 交错角  $45\sim 75^\circ$ 。

(3) 本研究认为, 以  $j$  因子和  $f$  因子的比值  $j/f$  来衡量 CC 表面的综合性能是合适的, 在本次试验范围内, 宽高比较大的表面, 综合性能较好。

(4) 在本研究的试验范围内, 3 个试件中, 试件 3 在相同  $Re$  时, 其  $j/f$  值均明显大于试件 1 和试件 2,  $j/f$  值大小排序为: 试件 3 > 试件 2 > 试件 1。可以认为, 在所进行的试验范围内, 试件 3 表面具有较佳的综合性能。

### 参考文献:

- [1] 崔晓钰, 关欣, 王金旺, 等. 能源岛中回热技术的发展现状 [J]. 能源研究与信息, 2003, 19(2): 1-11.
- [2] COLIN F. McDONALD. Low-cost compact primary surface recuperator concept for micro-turbines [J]. Applied Thermal Engineering 2000, 20: 471-497.
- [3] CIOFALO M, STASIEK J, COLLINS M W. Investigation of flow and heat transfer in corrugated passages—I. experimental results [J]. Int J Heat and Mass Transfer, 1996, 39(1): 149-164.
- [4] SAVOSTIN A F, TIKHONOV A M. Investigation of the characteristic of plate-type heating surface [J]. Teplo-energetica, 1970(17): 75-78.
- [5] FOCKE W W, ZACHARIADES J. The effect of the corrugation inclination angle on the thermo-hydraulic performance of plate heat exchangers [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1985(28): 1469-1479.
- [6] 马虎根, 崔晓钰, 任禾盛, 等. 紧凑型回热器型面换热及阻力特性研究 [J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(5): 393-402.
- [7] 杨静, 程惠尔. 一次表面回热器的流动和传热研究 [J]. 动力工程, 2003, 23(6): 2823-2826.
- [8] 余红英. 微型燃机一次表面回热器流动与传热数值研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [9] 聂嵩, 曲伟. CC 型原表面回热器传热与流动数值模拟 [J]. 工程热物理学报, 2004, 25(6): 989-991.
- [10] UTRIAINEN E, SUNDEN B. Evaluation of the cross corrugated and some other candidate heat transfer surfaces for microturbine recuperators [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(7): 550-560.

(编辑 孙显辉)

端壁造型在叶轮机中的应用与发展= **Application and Development of End-wall Profiling in Turbomachinery** [刊, 汉]/LU Jia-ling, CHU Wu-li, LIU Zhi-wei (College of Power and Energy Source, Northwest China Polytechnic University, Xi'an, China, Post Code: 710072), ZHU Jun-qiang (Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 687 ~ 691

Reviewed was the evolution of a new design technology—end-wall profiling technology, which can reduce secondary flow losses in the zones around end-walls. The technology may enhance the thermal efficiency of a turbine, and has been widely verified with relevant conclusions being adopted directly in engineering projects. Although the research for applying the above technology in compressors is somehow delayed in comparison with that in turbines, the latest research findings show that the technology has played a definite role in such efforts as changing the shock wave structure of a transonic compressor, improving its stable operating margin and reducing the separation of flows in the corners of stationary blades. The technology in question reflects the research tendency of utilizing complex profiles to enhance turbomachine performance, and merits further study and investigation in the future by researchers. **Key words:** end-wall modeling, turbomachinery, turbine, compressor

CC型一次表面传热与阻力特性试验研究= **Experimental Study of Heat Transfer and Flow Resistance Characteristics of CC (Cross Corrugated) Type Primary Surfaces** [刊, 汉]/MA Hu-gen (College of Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), DUAN Rui (College of Energy Source and Environment Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200090)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 692 ~ 695

Described were the development of primary surface heat transfer and the current status of its research both at home and abroad. By adopting a single-blow transient method, the heat transfer and flow resistance characteristics of three kinds of CC (cross corrugated) type primary surfaces were experimentally studied. A mathematical model was established, and the functional relationship among the fluid outlet temperature, time and  $NTU$  (number of transfer units), obtained from numerical solutions. Through a proportioned matching, the  $NTU$  value of the heat exchange surface under the relevant measurement conditions was determined with the test correlation of  $j$  and  $f$  for the three kinds of CC surface being obtained for the first time. Both  $j$  and  $f$  factor decrease gradually with an increase of  $Re$  number, conforming with the general law featuring the heat transfer and flow resistance performance of compact surfaces. After an error analysis, the fit error obtained from the test correlation being provided was assessed as not greater than 15%, offering sufficient engineering precision. The conditions for using the correlation are given as follows;  $Re = 120 \sim 800$ , the equivalent diameter of the heat exchange surface equals to 1.2 ~ 1.4 mm and the staggered angle ranges from 45 degrees to 75 degrees. By using the comprehensive evaluation factor of  $j/f$ , the performance of the three kinds of surface was analyzed. The research results show that the profile with a comparatively great width/height ratio can secure a relatively good comprehensive performance. The data thus obtained were also compared with the numerical simulation results of other academics both at home and abroad. The test data are basically in agreement with the numerical simulation results. **Key words:** CC (Cross Corrugated) type primary surface, single-blowing transient change method, heat transfer and flow resistance characteristics, heat exchanger

一次表面回热器动态特性的数值模拟与实验研究= **Numerical Simulation and Experimental Study of the Dynamic Characteristics of a Primary Surface Recuperator** [刊, 汉]/LIU Zhen-yu, SU Yong-kang, CHENG Hui-er (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 696 ~ 699

Numerically analyzed and experimentally studied were the dynamic characteristics of a primary surface recuperator (PSR) when it undergoes a step change of flow rates. In the light of the energy conservation theory and structural features of the PSR, a differential equation was derived, indicating a temperature change of the recuperator in an unsteady state between